

TARTU ÜLIKOOL
MATEMAATIKA-INFORMAATIKATEADUSKOND
Matemaatika instituut

Gerda Rakaselg

Osakeste parvega optimeerimise rakendamine elektribörsil
Bakalaureusetöö

Juhendaja
Dotsent Peep Miidla

TARTU 2013

Sisukord

Sissejuhatus	3
1 Eesti elektriturg.....	5
2 Elektribörs	7
2.1 Päev ette turg	8
2.2 Päevasisene turg.....	10
2.3 Balanseerimisturg.....	10
3 Ülesanne	11
3.1 Ülesande kujunemine	11
3.2 Ülesande formuleerimine	13
4 Osakeste parvega optimeerimine	16
4.1 Optimeerimisülesanne	16
4.2 Ülevaade meetodist	17
4.3 Meetodi kirjeldus	18
4.4 Meetodi arvutusskeem.....	19
4.5 Plokkskeem.....	21
5 Rakendus	23
5.1 Andmed	23
5.2 Eeldused.....	26
Summary	29
Kirjandus	30
Lisa 1. Turutasakaaluhindade tabel	31
Lisa 2. MATLABi kood turutasakaaluhindade genereerimiseks	32
Lisa 3. MATLABi kood kulufunktsioonide leidmiseks	33
Lisa 4. MATLABi kood osakeste parve modelleerimiseks	34

Sissejuhatus

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on anda ülevaade osakeste parvega optimeerimise (*Particle Swarm Optimization*) meetodist ja rakendada seda elektribörsil strateegilisel pakkumiste kujundamisel.

Osakeste parvega optimeerimine on metaheuristiliste metoodikate hulka kuuluv võte, mida on rakendatud varem juba toimivatel turgudel, näiteks Põhjamaades ja Ameerika Ühendriikides, elektrihinna pakkumise määramiseks.

Avatud elektriturg ja sellega kaasnev elektribörs on Eestis uudsed – hinnad hakkasid vabaturu tingimustes kujunema alles 2013. aasta algusest. Kuna turusüsteem on muutunud, peavad elektritootjad oma süsteemid ümber kujundama, sest see, kas ja kui palju elektriettevõtted kasumit teenivad, sõltub suuresti strateegiatest, mida nii tootmist kui ka müümist planeerides kasutatakse. Et elektrit võimalikult kõrge hinnaga müüa ja seeläbi kasumit kasvatada, vajatakse arvutuste tegemiseks sobivaid mudeleid ja meetodeid. Käesolev töö vaatleb müügiprotsessis rakendatavaid matemaatilisi mudeleid, elektri tootmise tehnilisele osale tähelepanu ei pöörata.

Selles referatiivses bakalaureusetöös on nii teoreetiline kui ka rakenduslik osa. Teoreetilises osas käsitletakse elektrituru ja elektribörsi süsteeme, kirjeldatakse elektribörsil tekkivat ülesannet ning tutvustatakse osakeste parvega optimeerimise meetodit. Rakenduslikus osas on kasutatud Eesti Energiast saadud algandmeid. Ülesanne on lahendatud rakendusprogrammiga MATLAB, mille kasutamisoskuse omandas töö autor spetsiaalselt selle töö koostamise tarvis. Lisades 2-4 on vastav MATLABi kood.

Töö esimeses peatükis antakse ülevaade Eesti elektrituru toimimisest, kirjeldatakse peamisi turuosalisi ja nendevahelisi seoseid.

Teises peatükis keskendutakse elektrituru ühele konkreetsele osale – elektribörsile. Eesti elektribörsi vaadeldakse selle kolme komponendi vajalikkust ja toimimise põhimõtteid selgitades.

Järgmisena kirjeldatakse ülesannet, mis kujuneb vabaturu tingimustes elektribörsil elektritootjate jaoks. Nimelt peavad elektritootjad tegema igapäevaselt otsuseid, milliste koguste ja hindadega pakkumisi elektribörsi korraldajale esitada, et võimalikult suurt kasumit teenida. Selles osas tuuakse sisse ka ülesande jaoks vajalikud tähistused ja seosed.

Neljandas peatükis tutvustatakse esmalt optimeerimisülesande üldist püstitust ning seejärel tutvustatakse osakeste parvega optimeerimise meetodit. Lisaks meetodile vajaliku sümboolika kirjeldamisele on antud osas PSO-meetodist parema ülevaate andmiseks nii pseudokood kui ka plokk skeem.

Viimases peatükis esitletakse programmiga MATLAB kirjutatud koodi läbimisel saadud tulemusi kahe elektrigeneraatori pakkumiste jaoks.

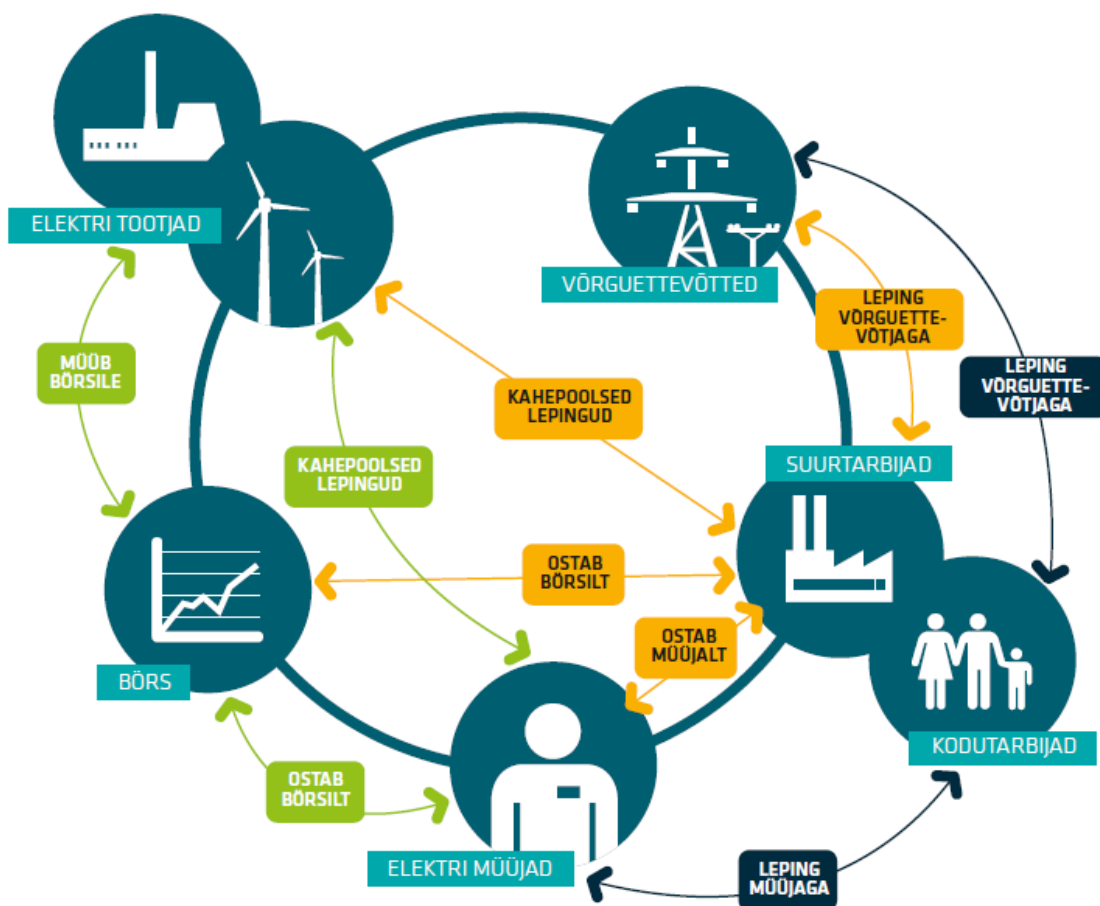
Tööle on lisatud ingliskeelne kokkuvõte ja kasutatud kirjanduse loetelu.

1 Eesti elektriturg

Selles peatükis vaatleme elektrituru süsteemi üldisemalt, et anda enne konkreetsema turuosa ja sellega seotud ülesande juurde minemist ülevaade elektrituru toimimise põhimõtetest Eesti näitel.

Käesoleva aasta 1. jaanuarist on Eesti elektriturg täielikult avatud, see tähendab, et enam ei reguleerita elektri hinda tsentraalselt nagu varem, vaid see kujuneb konkurentsisis müügipakkumiste ja ostupakkumiste vahel.

Joonis 1 annab ülevaate Eesti elektrituru toimimisest, siin on näidatud peamised turuosalised ja kirjeldatud nendevahelisi seoseid. Töö autor soovib tähelepanu juhtida sellele, et edaspidi keskendutakse elektribörsi toimimise uurimisele, mis on kahepoolsete lepingute kõrval vaid üks osa elektrituru süsteemist.



Joonis 1: Elektrituru osalised ja nendevahelised seosed [2], lk 59

Elektriettevõtete toodetud elektrienergia müüakse tarbijatele elektribörsil või kasutades selleks elektrimüüjat või bilansihaldurit ning transporditakse võrguettevõtte liinide kaudu tarbimiskohtadesse. Tootjad võivad suurtarbijatega ka otselepingud sõlmida. Eestis on ülekaalukalt suurim elektritootja Eesti Energia AS.

Elektritarbijad jaotatakse kodutarbijateks ja äri- ehk suurtarbijateks. Igal tarbijal peab olema leping nii elektrienergia müüja kui ka võrguettevõtjaga. Võrguettevõtjat, kes edastab toodetud elektrienergia tarbijani, ei ole tarbijal võimalik valida, sest ühte tarbimiskohta oleks liialt kulukas vedada mitmeid liine. Seetõttu on võrguettevõtja loomulik monopol. Vabaturu tingimustes on aga tarbijal võimalik valida elektrienergia müüjat [2], lk 59.

Võrguettevõtted jagunevad jaotusvõrguettevõteteks ja põhivõrguettevõtteks. Jaotusvõrguettevõtja osutab võrguteenust ning transportides elektrienergiat tootjalt tarbijale võimaldab teistel turuosalistel kaubelda füüsilise elektrienergiaga. Põhivõrguettevõtja osutab võrguteenust põhivõrgu kaudu, Eestis on selleks Elering. Lisaks sellele on Elering ka süsteemihaldur, kes vastutab Eesti elektrisüsteemi kui terviku toimimise eest, et igal ajahetkel oleks tarbijatele tagatud nõuetekohase kvaliteediga elektrivarustus [2], lk 60.

Elektrimüüja on see, kes ostab elektrienergiat kas otse tootjalt, elektribörsilt või teiselt müüjalt ja müüb seda edasi tarbijale või teisele müüjale.

Elektribörsi korraldab juriidiline isik, kes peab tagama elektribörsi toimimise ja elektrienergiaga kauplemise võimaluse. Eestis korraldab elektribörsi toimimist Nord Pool Spot AS. Nord Pool Spot on Euroopa suurim elektribörs, tegutsedes Põhjamaades, Suurbritannias, Saksamaal, Eestis, Lätis ja Leedus.

2 Elektribörs

Börs on organiseeritud turg, kus kaubeldakse aktsiate ja teiste väärtpaberitega või teatud kaupadega. Elektribörsil kaubeldakse elektrienergiaga.

Eesti näitel võib elektribörsi jagada kolmeks erinevaks komponendiks [7], lk 8:

- 1) päev ette turg (*day-ahead market*) – järgneval päeval tarnitava elektrienergiaga kauplemine;
- 2) päevasisene turg (*interday market*) – samal päeval tarnitava elektriga kauplemine, mis peab toimuma kuni üks tund enne tarnet;
- 3) balanseerimisturg (*balancing market*) – elektrituru tasakaalustamine reaajas.

Elektribörsi toimimise põhimõtted erinevad mitmeti väärtpaberiturgude toimimise põhimõtetest. Üks erinevus on näiteks see, et väärtpaberiturgudel on kauplemispäev kellaajaliselt konkreetselt määratud, samal ajal kui elektribörsil toimub kauplemine ööpäevaringselt. Elektribörsil pole võimalik passiivselt investeerida. Küll aga saab passiivselt investeerida väärtpaberiturul, kus on võimalik peale aktsiate ostmist tulu teenida ka lihtsalt aktsionär (ehk aktsia omanik) olles. Elektribörsilt elektri ostmise järel tuleb kasumi teenimiseks seda energiat seejärel ka edasi müüa.

Elektri tootmisest ja müümisest rääkides on oluline silmas pidada, et nii elektri tootmine ja müümine kui ka tarbijale üleandmine toimuvad ööpäevaringselt. Elektrienergiat ei saa ka akumuloida ega ette toota, kui juba toodetud energiat müüa ei õnnestu, läheb see raisku.

Nord Pool Spot AS korraldab Euroopa juhtivat elektriturgu hallates nii päev ette turgu, mis kannab nime Elspot (vt peatükk 2.1), kui ka päevasisest turgu nimega Elbas (vt peatükk 2.2). Nord Pool Spoti turgudel kauplevad firmad kokku kahekümnest riigist, nende hulgas näiteks Norra, Taani, Rootsi, Soome, Saksamaa, Läti, Leedu ja Eesti [4].

2.1 Päev ette turg

Päev ette turul toimub oksjonipõhine elektrienergiaga kauplemine, kus nõudlusest ja pakkumisest tulenev tasakaaluhind arvutatakse iga kauplemispiirkonna järgmise päeva iga tunni kohta eraldi.

Eestis elektribörsi toimimist korraldava Nord Pool Spot AS'i päev ette oksjon kannab nime Elspot [4]. Elspot tegutseb Soomes, Rootsis, Norras, Taanis, Lätis, Leedus ja Eestis. Elspot turg on omakorda jaotatud eraldi hinnapiirkondadeks, 2013. aasta maikuu seisuga on Elspotil hinnapiirkondi 17. Nord Pool Spot'i vahendatavate tehingute poolest on mahukaim just päev ette turg – Elspot.

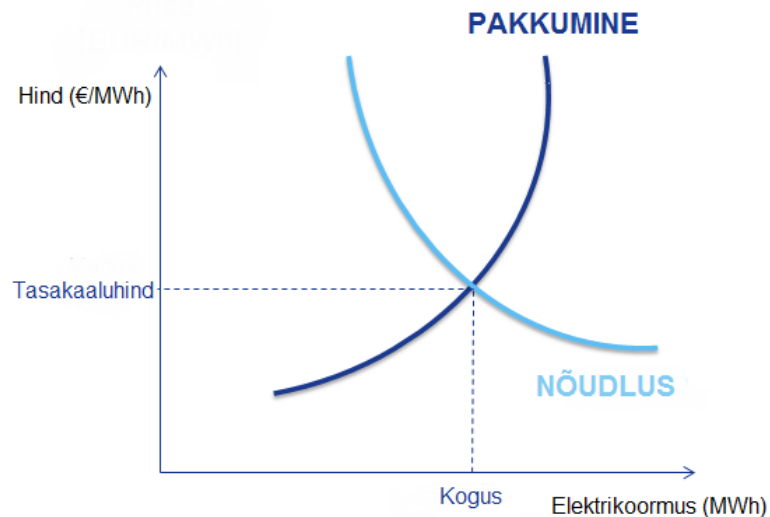
Oksjonil osalemiseks peavad elektriostjad hindama vastava päeva kohta, kui palju nad energiat tarbijatele või teistele elektrimüüjatele edasi müümiseks vajavad ja kui palju ollakse nõus vastava elektrikoguse eest maksma. Müüjad omakorda peavad tegema otsuse, kui palju suudetakse energiat toota ja millise hinnaga ollakse nõus seda müüma.

Nii ostjad kui ka müüjad võivad esitada pakkumisi (*bid*) kuni 14 päeva ette, kuid hiljemalt elektrienergia tarne päevale eelneval päeval kell 12:00 CET (*Central European Time* – Kesk-Euroopa aeg) peavad oksjonil osalemiseks olema pakkumised esitatud Nord Pool Spoti veebisüsteemi kaudu.

Elspotile esitatud kogused ja hinnad on turuosaliste jaoks siduvad lepingud, see tähendab, et kui pakkumisel esitatud hind müüja puhul on turutasakaaluhinnaga võrdne või sellest madalam ja ostja puhul turutasakaaluhinnaga võrdne või sellest kõrgem, on nad kohustatud pakkumises esitatud koguses vastavalt elektrit müüma või ostma [1], lk 335.

Järgnevalt selgitab töö autor, mis on turutasakaaluhind. Kui pakkumisperiood on lõppenud, järjestatakse müügipakkumised hinna järgi kasvavas ja ostupakkumised kahanevas järjekorras ning leitakse iga tunni kohta turutasakaaluhind. Piltlikult kujutatakse selleks pakkumiskõver ja nõudluskõver ühes ja samas teljestikus. Tasakaaluhind asub pakkumiskõvera ja nõudluskõvera lõikepunktis.

Müüjad, kes esitasid Elspotile tasakaaluhinnast madalama hinnaga pakkumise, müüvad vastavalt esitatud koguse energiat, ja ostjad, kes esitasid tasakaaluhinnast kõrgema hinnaga pakkumise, ostavad vastavalt esitatud koguse energiat. Kõik tehingud toimuvad turutasakaaluhinnaga.



Joonis 2: Nõudlus ja pakkumine elektribörsil [4]

Vaatleme pakkumiskõverat ja nõudluskõverat koordinaatteljistikus (joonis 2), mille abstsissiteljel on kujutatud elektrikoormust (MWh) ja ordinaatteljel elektri hinda ($€/MWh$). Kõverate lõikepunkt määrab abstsissiteljel turutasakaalule vastava elektri koguse ning ordinaatteljel turutasakaaluhinna. Seega toimub vastaval tunnil Elspoti kaudu just sellise elektrikoormuse ulatuses tehinguid ja need kõik teostatakse vastavalt leitud turutasakaaluhinnaga.

Pakkumiskõverale vastav funktsioon on kasvav, sest tootjad soovivad oma kasumit maksimeerida ning mida kõrgem on hind, seda suurem osa müüjaid ja ka suuremaid koguseid tahetakse müüa. Nõudluskõverale vastav funktsioon on aga kahanev, sest mida kõrgem on hind, seda vähem on neid, kes sellise hinnaga elektrit osta soovivad.

Vahel harva võib tekkida ka olukord, kus pakkumiskõver ja nõudluskõver ei lõiku, see võib olla tingitud olulisest elektrenergia ületootmisest või alatootmisest. Selleks puhuks on Elspotil kasutusel vastav meetod – *curtailment*. Olenevalt konkreetsest situatsioonist

nihutatakse kunstlikult kas pakkumiskõverat või nõudluskõverat ordinaatteljele lähemale, et kõverad siiski lõikuksid (täpsemalt saab selle kohta uurida Nord Pool Spoti veebilehelt [4]).

2.2 Päevasisene turg

Nord Pool Spoti päevasisene turg – Elbas – tegutseb Põhjamaades, Saksamaal ja Eestis ning on piiriülene. Elbas täiendab Elspoti ja aitab enamjaolt kindlustada tasakaalu elektriturul nõudluse ja pakkumise vahel.

Päevasisesel turul toimub kauplemine iga päev ööpäevaringselt kuni üks tund enne tarnet. Analoogselt päev ette turule saavad esmajärjekorras tehinguid sooritada madalaima müügihinnaga ja kõrgeima ostuhinnaga kauplejad.

Päevasisese turu tähtsus kasvab pidevalt seoses tuuleenergia järjest laialdasema kasutuselevõttuga, sest tuulegeneraatorite toodetavat energiamahu on keeruline prognoosida.

2.3 Balanseerimisturg

Balanseerimisturul peab süsteemioperaator (*transmission system operator*) kindlustama piirkonna elektrilise stabiilsuse, see tähendab, et tal tuleb tagada tasakaal nõudluse ja pakkumise vahel. Süsteemioperaator peab olema iseseisev, kuid mitte kaubanduslik organisatsioon, ja ühtlasi peab ta olema ka turuosaliste suhtes neutraalne. Eesti elektrisüsteemihaldur on Elering AS.

Balanseerimisturu puhul avalikustab süsteemioperaator hinna alles pärast tehingu toimumist.

3 Ülesanne

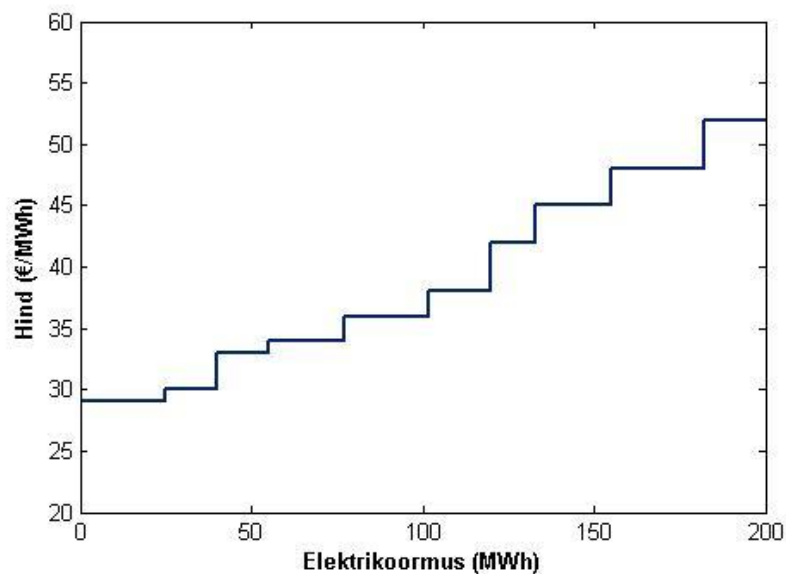
3.1 Ülesande kujunemine

Teoorias eeldatakse, et täieliku konkurentsi tingimustes, kus üksikmüüjad ei mõjuta oluliselt turuhinda, esitavad elektritootjad pakkumised elektribörsile vastavalt oma tootmiskuludele. Iga generaatori puhul sõltub ühe ühiku elektri tootmise kulu elektrigeneraatori toodetud kogusest. Seetõttu oleks vaja enne tootmiskulude arvutamist teada kogu toodetavat elektrikogust.

Üks võimalus oleks esitada börsile pakkumine, mille kogus vastab antud generaatori maksimaalsele võimsusele ning hind selle koguse tootmiskulule. Teine võimalus on jagada generaatori maksimaalsele võimsusele vastav elektrikogus N võrdseks plokiks ja pakkuda neid hindadega, mis vastavad ploki tootmiskuludele.

Reaalsuses ei kehti elektribörsil tavaliselt mitte täielik konkurents, vaid oligopolistlik konkurents, mida iseloomustab pakkujate vähesus ja tundlikkus konkurentide hinnapoliitika suhtes. Seega võib elektritootja kasvatada tulusid suurendades pakkumises esitatavat hinda. Sellist käitumist nimetatakse strateegiliseks pakkumiseks (*strategic bidding*). Selles on oluline roll turutasakaaluhinnal, kuna turutasakaaluhind määrab, millised tehingud toimuvad ja millise hinnaga need sooritatakse (vt peatükk 2.1). Strateegilise pakkumisega kaasneb oht, et kui pakkumise hind on liiga kõrge, ei pruugi tootja pakkumine valituks osutuda ning nii jääb kasum üldse saamata [3], lk 283.

Strateegilise pakkumise ülesanne seisneb seega elektribörsi päev ette turule esitatava pakkumise jaoks N ploki elektri koguste ja hindade määramises nii, et oodatavat kasumit maksimeerida. Joonisel 3 on näidatud, milline võiks ühe generaatori kohta käiv pakkumine olla.



Joonis 3: Generaatori pakkumiskõver elektribörsi päev ette turu jaoks

Käesolevas töös tutvustatakse ühte optimeerimismeetodit, millega eelpool kirjeldatud ülesannet lahendada, ning koostatakse mudel selle rakendamiseks. Me eeldame, et turutasakaaluhind ei ole täpselt teada, kuid meil on võimalikud stsenaariumid turutasakaaluhindadest 24 tunni jaoks. Lisaks eeldame ka, et mudelis vaatluse all oleva generaatori pakkumised ei mõjuta turutasakaaluhinda. Optimeerimisülesande eesmärk on maksimeerida elektritootja oodatavat kasumit. Mudel, mis käib ühe konkreetse elektrigeneraatori kohta, väljastab tulemusena N plokile vastavad kogused ja hinnad.

3.2 Ülesande formuleerimine

Oletame, et meil on elektritootja teatud arvu elektrigeneraatoritega. Tootja soovib koostada pakkumisi iga generaatori kohta elektribörsi päev ette turu jaoks. Eeldame, et tootja teenib oma kasumi müües toodetud energiat elektribörsil turutasakaaluhinnaga. Lisaks teeme veel eeldused, et

- pakkumine, mis koosneb maksimaalselt N hinna ja koguse paarist, tuleb määrata iga generaatori jaoks eraldi;
- otsused, mis tehakse konkreetse generaatori pakkumise hindade ja koguste kohta ei mõjuta turutasakaaluhinda;
- turutasakaaluhind igal tunnil on juhuslik suurus teatud parameetritega;
- pakkumine esitatakse enne päev ette turu sulgumist keskpäeval 12:00 CET ning see kehtib 24 tunni kohta alates keskööst 00:00 CET.

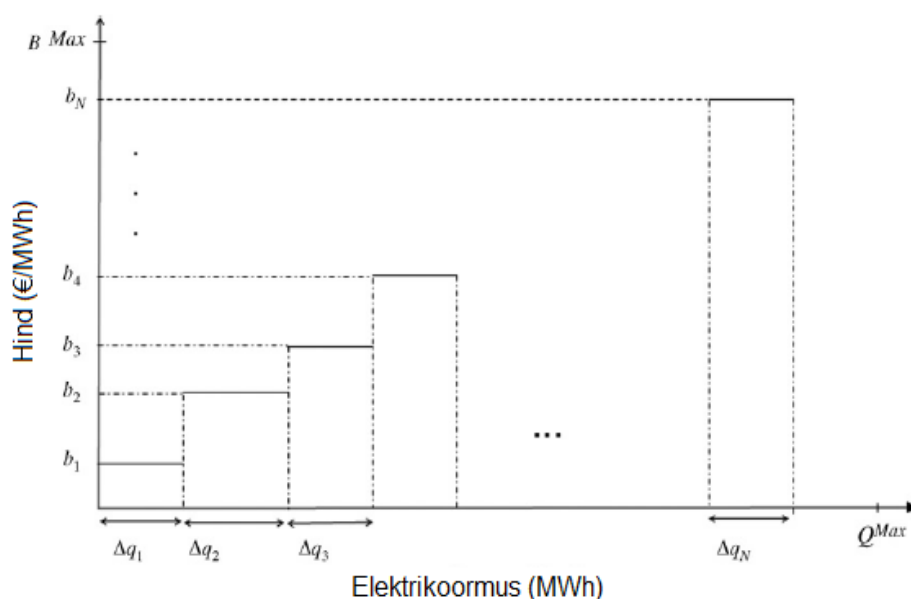
Järgnevalt kirjeldame mudelis kasutatavaid parameetreid ja muutujaid.

Parameetrid:

$C(q)$	q (MWh) elektri tootmise kulu (€/MWh)
a_1, a_2, a_3	generaatori kulufunktsiooni koefitsendid
p_t^k	turutasakaaluhind tunnil t stsenaariumi k järgi (€/MWh)
Q^{max}	generaatori maksimaalne võimsus (MWh)
B^{max}	maksimaalne lubatud pakkumishind (€/MWh)

Otsustusmuutujad (*decision variables*):

b_i	ploki i pakkumishind
Δq_i	ploki i pakkumisele vastav energiakoguse kasv
q_t	kogu tunnil t genereeritav energia



Joonis 4: Pakkumise hinnad ja kogused [1], lk 337

Konkreetses generaatori optimaalse pakkumiskõvera leidmiseks tuleb väärtustada N paari otsustusmuutujaid b_i ja Δq_i ($i = 1, \dots, N$). Muutuja Δq_i märgib hinnatasemele b_i jõudmiseks vajalikku energiakoguse kasvu (joonis 4). Neid muutujaid kujutavad vastavalt vektorid $\Delta \mathbf{q}$ ja \mathbf{b} . Kui turutasakaaluhind tunnil t on pakkumishinnaga b_i võrdne või sellest kõrgem, siis kõik sama või madalama hinnaga pakutavad energiaplokid saavad müüdnud. Seega energiakogust, mis tunnil t toodetakse ja hinnaga P_t elektriturul müüakse, iseloomustab suurus

$$q_t = \sum_{i=1}^{I(P_t)} \Delta q_i,$$

kus $I(P_t)$ on maksimaalne indeks j , mille korral kehtib $b_j \leq P_t$, $t = 1, \dots, T$.

Summa, mis kulub elektrigeneraatoriga energia tootmiseks, sõltub kulutatud kütuse kogusest ja seda saab tavaliselt hinnata ruutfunktsiooniga kujul

$$C(q) = a_1 q^2 + a_2 q + a_3,$$

kus q on ühe tunni jooksul toodetava energia kogus, seda funktsiooni nimetame kulufunktsiooniks.

Sihifunktsioon (vt peatükk 4.1) iseloomustab kasumit (müügitulu miinus tootmiskulu) 24 tunni kohta. Tulu määrab konkreetse turutasakaaluhinna puhul toodetav elektrikogus ja selle turutasakaaluhinnaga müümine ning kulu määrab elektrikogusele vastav kulufunktsiooni väärtus.

Eeldame, et 24 tunni turutasakaaluhindadest on K võrdse esinemisvõimalusega varianti. Tähistame turutasakaaluhinna varianti k tunnil t P_t^k , $k = 1, \dots, K$.

Eesmärk on maksimeerida oodatavat kasumit üle ajaperioodi T , tavaliselt on see 24 tundi. Formuleerime pakkumisülesande järgnevalt:

$$P(\Delta \mathbf{q}, \mathbf{b}) = \max_{\Delta \mathbf{q}, \mathbf{b}} [\textit{kasum}] = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T [p_t^k q_t^k - C(q_t^k)],$$

$$k = 1, \dots, K; \quad t = 1, \dots, T.$$

Kehtivad järgmised tingimused:

$$\sum_{i=1}^N \Delta q_i \leq Q^{\max},$$

$$0 \leq b_i \leq B^{\max}, \quad i = 1, \dots, N,$$

$$b_i \leq b_{i+1}, \quad i = 1, \dots, N,$$

$$0 \leq \Delta q_i \leq Q^{\max}, \quad i = 1, \dots, N,$$

$$q_t^k = \sum_{i=1}^{I(P_t^k)} \Delta q_i,$$

kus $I(P_t^k)$ on maksimaalne indeks i , mille korral kehtib $b_i \leq P_t^k$,

$$q_t^k \leq Q^{\max}, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 1, \dots, T,$$

$$C(q_t^k) = a_1 + a_2 q_t^k + a_3 (q_t^k)^2, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 1, \dots, T.$$

4 Osakeste parvega optimeerimine

4.1 Optimeerimisülesanne

Toome siinkohal kõigepealt ära optimeerimisülesande üldise püstituse.

Olgu antud hulk X ja selle hulga elemendid $x \in X$ ning funktsioon $f: X \rightarrow \mathbb{R}$, niinimetatud sihifunktsioon (*objective function*) või sobivusfunktsioon (*fitness function*), kus \mathbb{R} on reaalarvude hulk. Antud on ka funktsioonid $g_i: X \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, 2, \dots, m$, niinimetatud kitsendusfunktsioonid (*constraint functions*). Hulka

$$\Omega = \{x \in X \mid g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$$

nimetatakse lubatavate lahendite hulgaks (*feasible set*). Ülesanne seisneb $\max f(x)$ leidmises üle kõigi elementide $x \in \Omega$.

Üldisust kitsendamata võime optimeerimisülesannet vaadelda maksimeerimisülesandena, sest minimeerimisülesande saab esitada maksimeerimisülesande kaudu kui asendada funktsioon f funktsiooniga $-f$.

Elementi $x^* \in X$, mis realiseerib funktsiooni f maksimumi lubatavate lahendite hulgal Ω , nimetatakse optimeerimisülesande lahendiks. Optimeerimisülesannetel võib tavaliselt olla mitu lahendust. Mittelahenduvus tähendab aga seda, et lubatavate lahendite hulk Ω on tühi või tõkestamata.

Sageli on optimeerimisülesande muutujad x n -mõõtmelised vektorid, nii ka osakeste parvega optimeerimise puhul. Sel juhul on sobivusfunktsiooni määramispiirkond n -mõõtmeline ruum, $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$.

Enamuse ülesannete puhul on kõikide võimalike lahenduse variantide läbivaatamine liiga ajamahukas või töömahukas. Optimeerimismeetodid püüavad igal sammul konstrueerida paremat lahendit kui seni teadaolev.

Konkreetsel meetodi valikul, sihifunktsioonil, selle määramispiirkonnal ja kitsendusfunktsioonidel sõltuvad ülesande püstitusest.

4.2 Ülevaade meetodist

Metaheuristiline meetod on looduse toimimisest inspireeritud algoritm optimeerimisülesande lahendamiseks. Inimesed jälgivad näiteks sipelgate, mesilaste või lindude käitumist või analüüsivad evolutsiooni toimimise põhimõtteid ning koostavad siis selle põhjal sellise matemaatilise mudeli, et juhuslike suuruste ja konstantide varieerimise abil saaks neid kasutada optimeerimisülesannete lahendamiseks.

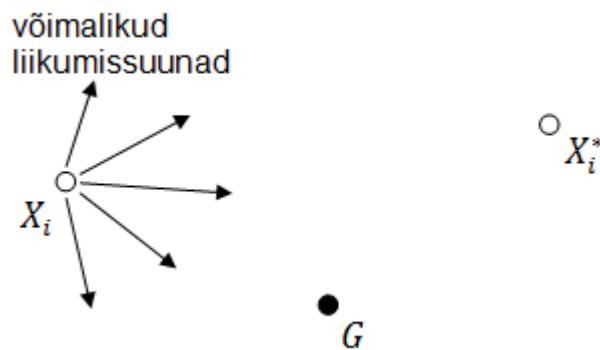
Osakeste parvega optimeerimine (*Particle Swarm Optimization*), edaspidi ka PSO-meetod, on metaheuristiline meetod, mis on inspireeritud kalade ja lindude sotsiaalsest käitumisest vastavalt kala- ja linnuparvedes [5]. Selle meetodi arendasid 1995. aastal välja ameeriklased James Kennedy ja Russell C. Eberhart.

Linnuparve puhul võib situatsiooni, millest PSO on inspiratsiooni saanud, näitlikult vaadelda järgmiselt: parv otsib mingis kindlas piirkonnas süüa. On teada, et sellel alal on ainult üks toidupala, kuid ükski lind ei tea, kus see asub. Iga lind teab igal hetkel vaid seda, millises seni läbitud punktides oli ta toidule kõige lähemal. Seega kui linnud saavad omavahel suhelda, siis eeldusel, et nad oskavad enda parimaid tulemusi omavahel võrrelda, on kasulik jälgida seda lindu, kes on toidupalale kõige lähemal.

Osakeste parvega optimeerimine tegeleb seega justkui bioloogilise süsteemi, milleks on näiteks linnuparv või kalaparv, kollektiivse käitumise modelleerimisega. Selle süsteemi individuaalsed elemendid, mida nimetatakse osakesteks (*particles*), saavad informatsiooni nii keskkonnast kui ka omavahelisest suhtlusest. Kui linnuparv koosneb lindudest, siis PSO-meetodi parv koosneb osakestest.

4.3 Meetodi kirjeldus

Osakeste parvega optimeerimise algoritm otsib optimaalset lahendit osakeste liikumise abil. Me vaatleme osakest asuvana ruumis \mathbb{R}^n ja märgime osakese asukohta vektoriga $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$. Iga osakest „tõmbab“ nii tema enda senise parima asukoha $X_i^* = [x_{i1}^*, x_{i2}^*, \dots, x_{in}^*]$ kui ka kogu parve osakeste senise globaalse parima asukoha $G = [g_1, g_2, \dots, g_n]$ poole (joonis 5), samas on osakatel aga ka kalduvus liikuda juhuslikult. Kui osake satub punkti, mis on ülesande seisukohalt parem kui kõik tema eelnevad asukohad, uuendatakse selle konkreetse osakese parimat tulemust [8], lk 203-204.



Joonis 5: Osakese liikumine [8], lk 204

Osakeste populatsioonile antakse ülesandega kooskõlas olevast vahemikust juhuslikud algväärtused ning otsitakse optimaalset lahendit osakeste põlvkondi uuendades.

Iga osake peab meeles koordinaate, mis on seotud tema senise parima tulemusega. Kõik osakesed teavad ka selle punkti koordinaate, kus on saavutatud seni parim tulemus kõigi parve osakeste peale kokku. Selleks, et neid siiani parimaid tulemusi uute positsioonide ja tulemustega võrrelda, tuleb meeles pidada ka nendes punktides saavutatud tulemusi ehk sobivusfunktsiooni (*fitness function*) väärtuseid. Sobivusfunktsiooniks on konkreetse ülesande puhul see funktsioon, mille ekstremaalset väärtust PSO-meetodiga leida soovitakse.

Parve osakesi vaadeldakse ruumis liikuvatena ning seetõttu on igal osakesel ka ajas muutuv kiirus. Kiirus sõltub osakese senisest parimast tulemusest, globaalsest parimast

tulemusest, osakese eelnevast kiirusest ning ka konstantidest ja juhuslikest suurustest, täpsemalt tuleb sellest juttu töö järgmises alapunktis.

Kõigile osakestele uute asukohtade leidmist, nende võrdlemist eelnevate tulemustega ja vajadusel parimate tulemuste uuendamist nimetame iteratsioonisammuks. Eesmärk on leida globaalselt parim tulemus kõigi selle hetkeni parimate tulemuste hulgast kuni on jõutud peatumise kriteeriumini. Lõpetamiskriteeriumiks võib olla näiteks see, et ettemääratud arvu iteratsioonisammude jooksul tulemus ei parane, etteantud iteratsioonisammude koguarv saab täis või arvutuste ajaline limiit saab läbi.

4.4 Meetodi arvutusskeem

Osakeste parvega optimeerimise põhilised sammud saab kokku võtta pseudokoodina (joonis 6).

```

For i = 1 to m
    väärtusta  $X_i(0) = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ 
    määra  $V_i(0) = V_{min}$ 
    määra  $X_i^*(0) = X_i(0)$ 

    leia  $G(0) = \underset{i \in \{1, \dots, m\}}{\text{sobivaim}} X_i^*(0)$ 

    While (lõpetamiskriteerium pole täidetud)
        For i = 1 to m
            arvuta  $V_i(t) = wV_i(t-1) + c_1R \times [X_i^*(t-1) - X_i(t-1)]$ 
                 $+ c_2R \times [G(t-1) - X_i(t-1)]$ 
            leia  $X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t)$ 
            leia  $X_i^*(t) = \text{sobivaim}\{X_i^*(t-1), X_i(t)\}$ 
        t = t + 1

```

Joonis 6: Osakeste parvega optimeerimise meetodi pseudokood [1], lk 338

Kirjeldame järgnevalt osakeste parvega optimeerimise põhilisi elemente – osake, populatsioon, kiirus, osakese parim tulemus ja globaalne parim tulemus – veidi lähemalt [1], 338-339:

- 1) Parve ühte osakest kujutab n -dimensionaalne vektor, n väärtuse määrab otsustusmuutujate arv. Ajahetkel t saab osakest i kirjeldada kujul

$$\mathbf{X}_i(\mathbf{t}) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{in}(t)],$$

siin tähistab x_{ij} osakese i positsiooni koordinaadi j suhtes.

- 2) Parve populatsioon koosneb igal ajahetkel t m osakesest ja populatsiooni saab osakeste asukohti kirjeldavate vektorite kaudu esitada kujul

$$\textbf{POP}(\boldsymbol{t}) = \begin{cases} X_1(t) = [x_{11}(t), x_{12}(t), \dots, x_{1n}(t)] \\ X_2(t) = [x_{21}(t), x_{22}(t), \dots, x_{2n}(t)] \\ \dots\dots\dots \\ X_m(t) = [x_{m1}(t), x_{m2}(t), \dots, x_{mn}(t)] \end{cases}$$

- 3) Osakestele uute asukohtade määramiseks on igal osakesel oma kiirus. Osakese kiirus ajahetkel t on n -dimensionaalne vektor kujul

$$\mathbf{V}_i(\mathbf{t}) = [v_{i1}(\mathbf{t}), v_{i2}(\mathbf{t}), \dots, v_{in}(\mathbf{t})].$$

- 4) Iga osakese vaadeldavaks ajahetkeks läbitud positsioonidest parim jäetakse meelde kujul

$$\mathbf{X}_i^* = [x_{i1}^*, x_{i2}^*, \dots, x_{in}^*].$$

Osakeste individuaalseid parimaid tulemusi kasutatakse selle PSO-meetodi puhul arvutuste tegemisel selleks, et suurendada otsingute mitmekesisust ja parandada seeläbi meetodi toimimise kvaliteeti. Osakeste parvega optimeerimise ühes lihtsustatud versioonis osakeste individuaalseid parimaid tulemusi generatsioonide uuendamisel ei arvestata ja kasutatakse vaid globaalset parimat tulemust [8].

- 5) Globaalne seni parim tulemus ehk kogu parve osakeste parimatest tulemustest omakorda parim senine positsioon on kujul

$$\mathbf{G} = [g_1, g_2, \dots, g_n].$$

- 6) Meetodi metaparameeter w iseloomustab osakese inertsit, see kontrollib osakese eelneva kiiruse mõju praegusele kiirusele. Kui see parameeter w on suur, siis muutub otsimine globaalsemaks ning ka vastupidi, kui see parameeter on väike, siis on otsimine pigem lokaalsem.
- 7) Konstante c_1 ja c_2 nimetatakse ka „õppimisfaktoriteks“ (*learning factors*), need määravad kui kiiresti osake vastavalt enda parima tulemuse ja globaalse parima tulemuse suunas liigub. Tavaliselt võetakse $c_1 = c_2 = 2$.
- 8) Juhuslikkuse vektor R , mis kujutab endast n -dimensionaalset vektorit, mille koordinaadid on juhuslikud suurused vahemikust $(0,1)$, aitab muuta paremate positsioonide otsingud osakeste parvega optimeerimise meetodi puhul juhuslikumaks.

Osakesele uue kiirusvektori leidmiseks kasutatakse valemit

$$V_i(t) = wV_i(t-1) + c_1R \times [X_i^*(t-1) - X_i(t-1)] + c_2R \times [G(t-1) - X_i(t-1)].$$

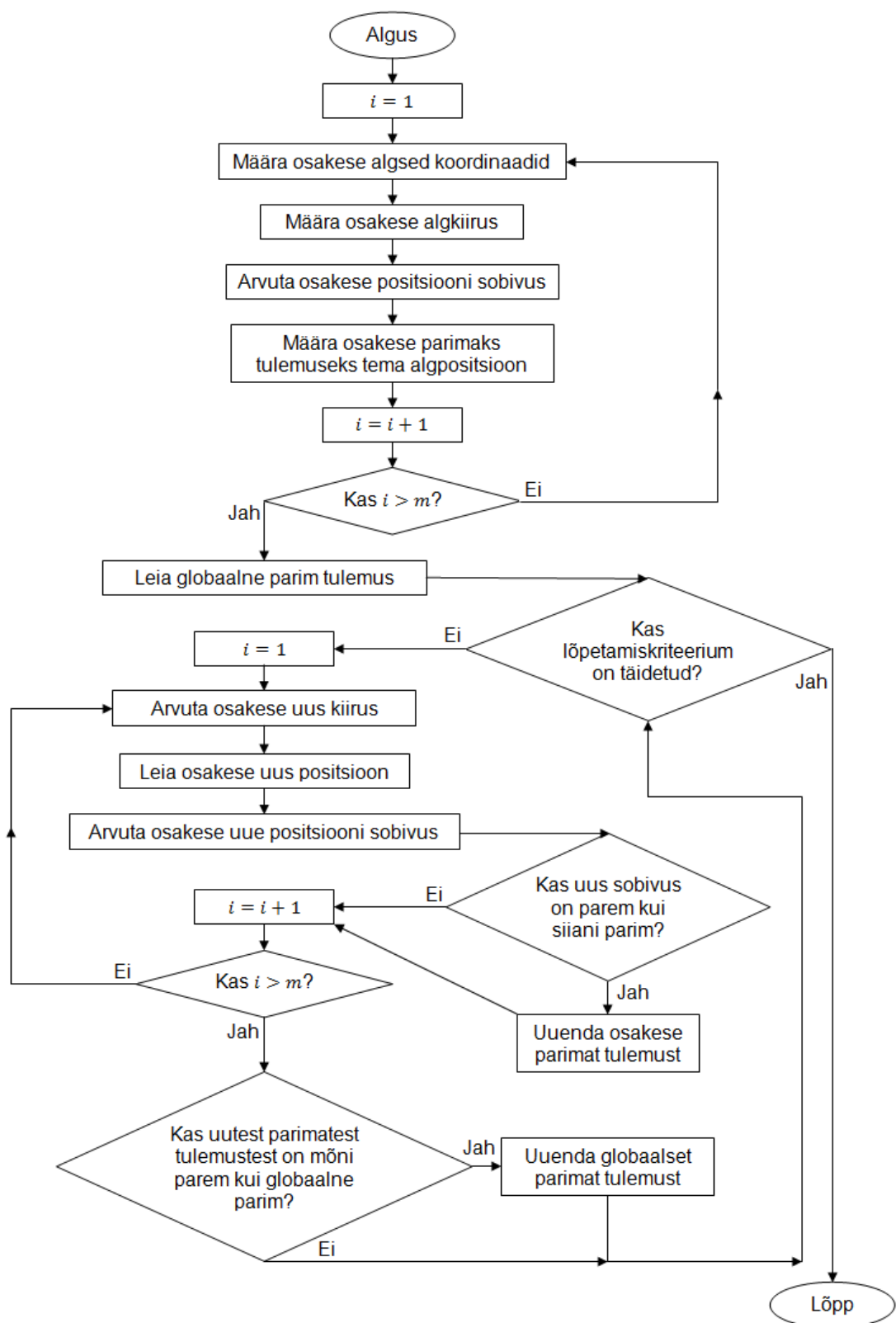
Kui kiirus on leitud, saab osakese uue asukoha määrata valemiga

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t).$$

4.5 Plokkskeem

Esitame järgnevalt plokkskeemi osakeste parvega optimeerimise meetodi realiseerimiseks (joonis 7). See annab kõige paremini lihtsustatud ülevaate sellest süsteemist kasutamata spetsiifilisi tähistusi ja valemuid.

Plokkskeemis tähistavad ovaalid programmi algust ja lõppu, ristkülikud mingit protsessi, andmete muutust, ning rombide otsustamist sõltuvalt sellest, kas teatud tingimused on täidetud. Plokkskeemi erinevate osade vahel aitavad liikuda nooled, ovaalidest ja ristkülikutest väljub alati ainult üks nool, aga rombide puhul peab jälgima, kas liikuda edasi mööda vastava tingimuse täidetust kinnitavat või ümber lükkavat noolt.

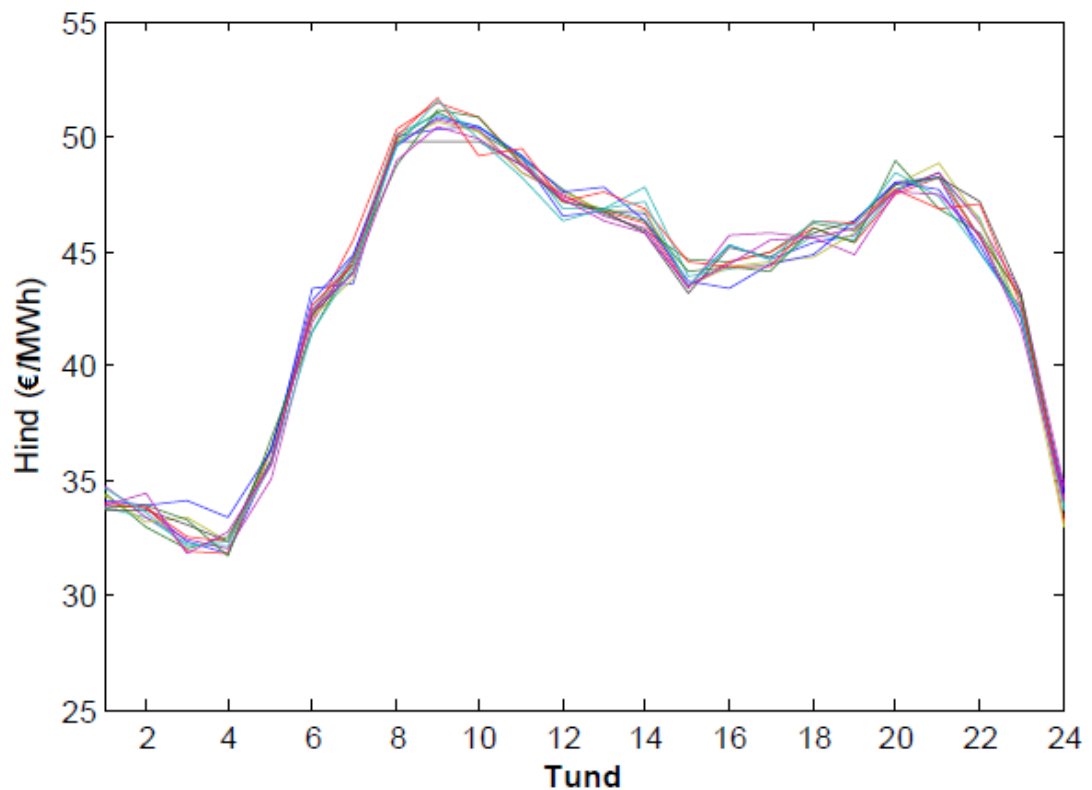


Joonis 7: Plokkskeem PSO-meetodi realiseerimiseks

5 Rakendus

5.1 Andmed

Nord Pool Spoti veebilehel [4] on avalikult väljas kõigi päev ette turu Elspot piirkondade turutasakaaluhinnad. Selle töö tarbeks võtsime sealt andmed Eesti piirkonna 17. aprilli turutasakaaluhindade kohta ning kasutades programmi MATLAB võimalusi genereerisime nende põhjal 12 versiooni 24 tunni hindadest. Programmikood (vt Lisa 2) ja genereeritud hindadest koosnev tabel (vt Lisa 1) on lisatud töö lõppu. Siinkohal toome ära joonise (joonis 8), mis iseloomustab turutasakaaluhindadest leitud 12 stsenaariumi.



Joonis 8: 12 versiooni turutasakaaluhindadest 24 tunni kohta

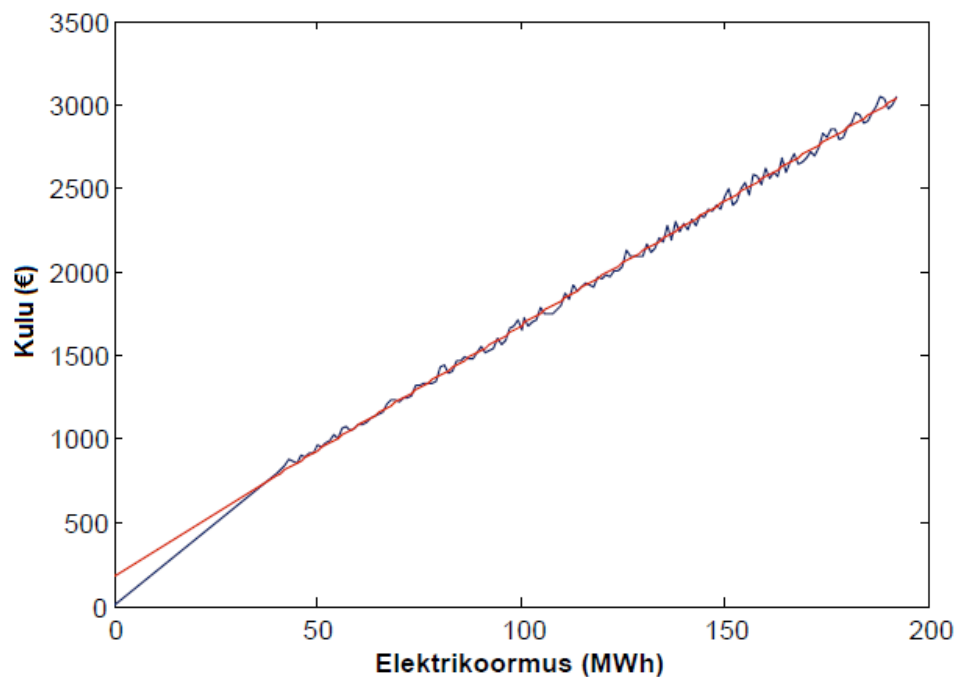
Elektri tootmise kulu hindamiseks vajame generaatorite kulufunktsioone. Selle tarbeks kasutasime Eesti Energiast saadud algandmeid kahe generaatori, tähistame neid *Gen_1* ja *Gen_2*, elektrikoormuste ja põlevkivist elektri tootmise kasutegurite kohta.

Esmalt arvutasime kummagi generaatori koormustele vastavad kulud eurodes järgmise valemi põhjal

$$S = \frac{E}{\alpha * \beta} * H,$$

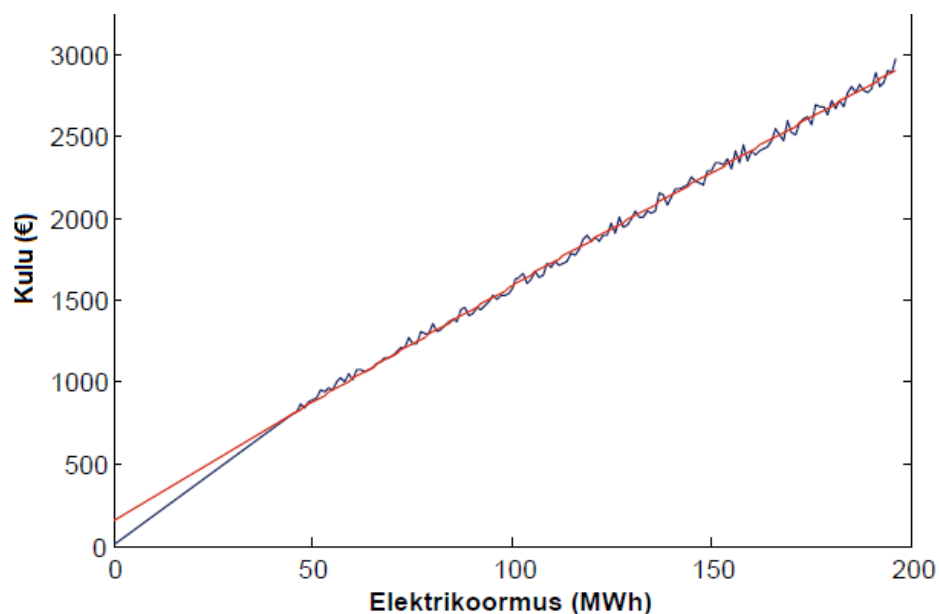
kus E tähistab elektrikoormust, α sellele elektrikoormusele vastavat kasutegurit, β põlevkivi kütteväärtust ning H põlevkivi hinda. Põlevkivi hinnaks arvestame allika [6] põhjal 12 (€/t).

Seejärel kasutasime MATLABi sisseehitatud võimalusi lähendamaks saadud tulemust ruutpolünoomiga. Joonistel 9 ja 10 on kujutatud vastavalt *Gen_1* ja *Gen_2* kulud elektritootmisele otseselt algandmetest tehtud arvutuste põhjal ning lähenditena leitud kulufunktsioonide graafikud.

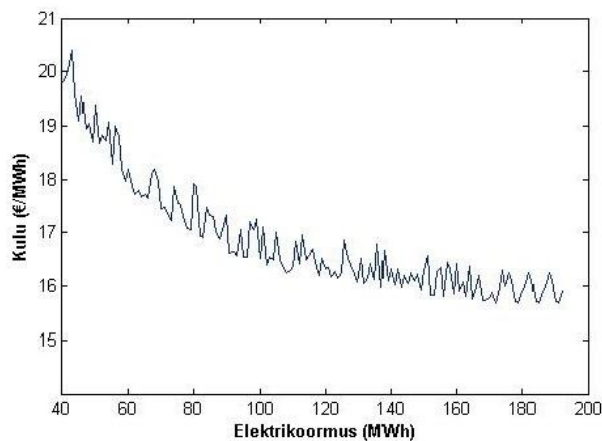


Joonis 9: *Gen_1* kulu elektri tootmisele

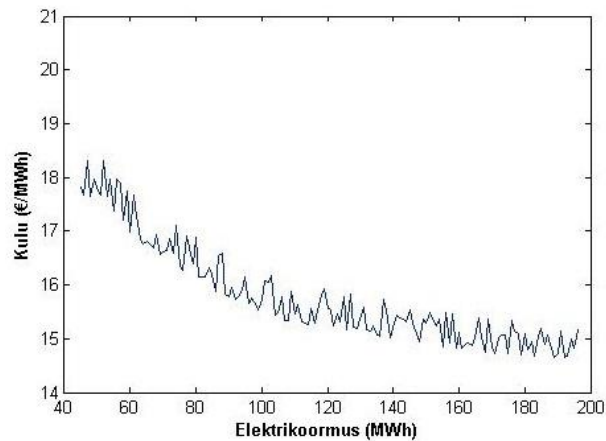
Joonis 10: *Gen_2* kulu elektri tootmisele



Lisame siia veel ka joonised, mis iseloomustavad *Gen_1* (joonis 11) ja *Gen_2* (joonis 12) vastava elektrikoormuse tootmiseks kuluvat summat eurodes ühe ühiku kohta (€/MWh).



Joonis 11: *Gen_1* kulu elektri tootmisele ühiku kohta



Joonis 12: *Gen_2* kulu elektri tootmisele ühiku kohta

5.2 Eeldused

Rakendame osakeste parvega optimeerimise meetodit elektribörsi pakkumise ülesandele kasutades 30 osakesest koosnevat parve. Määrame konstandid $c_1 = 2$, $c_2 = 2$ ja $w = 0.5$ ning maksimaalse plokkide arvu ühes pakkumises $N = 10$ allika [1], lk 341, põhjal.

Me leiame pakkumise hinnad ja kogused kahe generaatori jaoks. *Gen_1* maksimumvõimsus on $Q^{max} = 192 \text{ MWh}$ ja kulufunktsioon, mille me selle peatüki eelmises punktis kirjeldatud viisil Eesti Energiast saadud andmete põhjal arvutasime, on

$$C(q) = -0,0015q^2 + 15,2010q + 175,1818.$$

Gen_2 maksimumvõimsus on $Q^{max} = 196 \text{ MWh}$ ja kulufunktsioon on

$$C(q) = -0,0032q^2 + 14,6567q + 152,8198.$$

Turutasakaaluhind elektribörsi päev ette turul on muutlik, sest see sõltub näiteks nõudlusest, generaatorite võimsustest ja põlevkivi hinnast. Tasakaaluhind võib suuresti kõikuda ka ühe päeva lõikes (joonis 8), seda peamiselt just selle tõttu, et energia nõudlus sõltub otseselt kellaajast. Turutasakaaluhindade ennustamiseks on olemas eraldi meetodid, kuid kuna selle töö eesmärk ei ole neid analüüsida, siis kasutame lihtsalt juhuslike suuruste abil genereeritud 12 versiooni 24 tunni turutasakaaluhindadest Elspoti Eesti piirkonna 17. aprilli andmete põhjal (vt peatükk 5.1). Tabel genereeritud hindadega on käesoleva töö lisas (vt Lisa 1).

Me katsetame selle töö tarvis koostatud MATLABi programmi kummagi generaatori, *Gen_1* ja *Gen_2*, jaoks kolmel versioonil:

- 1) korduste arvuga $R = 10$ ja tsüklite arvuga $C = 400$;
- 2) korduste arvuga $R = 20$ ja tsüklite arvuga $C = 200$;
- 3) korduste arvuga $R = 40$ ja tsüklite arvuga $C = 100$;

Korduste arv R määrab, mitu korda alustatakse ühe programmi täitmise jooksul osakeste parve genereerimisega algusest peale ning tsüklite arv C näitab, mitu korda iga korduse jooksul osakeste parve asukohti uuendatakse. Seega lõplik lahendus leitakse võrreldes

omavahel seni parimaid tulemusi kõigi korduste ($r = 1, \dots, R$) lõikes ning igas korduses omakorda leitakse parim tulemus võrreldes omavahel iga järgneva tsükli läbimisel saavutatud tulemusi. Kõigil kolmel juhul läbitakse parve osakeste asukohtade uuendamise ja nendest seni parima asukohaga osakese tulemuse ja asukoha leidmise protsess 4000 korral,

$$10 * 400 = 20 * 200 = 40 * 100 = 4000.$$

Sellised korduste ja tsüklite arvud on valitud allika [1] eeskujul.

5.3 Tulemused

Selles punktis toome välja elektribörsi päev ette turu jaoks pakkumise koostamiseks kirjutatud MATLABi koodi (vt Lisa 4) tulemused kahe generaatori kohta eelnevalt kirjeldatud tingimustel.

Kõigepealt vaatame tulemusi esimese generaatori *Gen_1* kohta. Tabelis 1 on elektrikoormuse ja hinna paarid 10 ploki jaoks kõigi kolme korduste ja tsüklite arvust sõltuva variandi kohta (vt peatükk 5.2). Tabelis 2 on nende kolme versiooni kohta sobivusfunktsiooni väärtused ehk oodatavad kasumid. Näeme, et neist parim tulemus 10212,73 on saavutatud korduste arvuga $R = 10$ ning tsüklite arvuga $C = 400$, kuid erinevus tulemuste vahel on küllaltki väike.

Plokk	$R = 10, C = 400$		$R = 20, C = 200$		$R = 40, C = 100$	
	q_i (MWh)	b_i (€/MWh)	q_i (MWh)	b_i (€/MWh)	q_i (MWh)	b_i (€/MWh)
1	18,59	30,51	18,14	31,06	18,83	29,86
2	37,22	31,81	35,97	31,83	35,74	31,20
3	56,49	32,89	54,32	33,38	54,69	31,52
4	74,67	33,39	73,55	33,53	72,33	32,49
5	92,78	33,82	91,96	34,14	90,16	33,48
6	110,39	35,67	111,31	35,24	108,40	33,54
7	129,23	38,53	128,77	38,85	126,24	33,56
8	148,28	38,91	146,82	40,21	144,69	42,33
9	165,76	40,12	165,22	40,45	163,51	42,73
10	191,56	41,63	191,88	42,75	190,54	43,16

Tabel 1: *Gen_1* PSO-meetodil saadud hinnad ja kogused ploki kaup

Parameetrid	Tulemus (€)
$R = 10, C = 400$	10212,73
$R = 20, C = 200$	10068,10
$R = 40, C = 100$	10182,60

Tabel 2: *Gen_1* tulemused

Vaatame nüüd tulemusi ka teise generaatori *Gen_2* kohta. Tabelis 3 on elektrikoormuse ja hinna paarid 10 ploki jaoks kõigi kolme korduste ja tsüklite arvust sõltuva variandi kohta. Tabelis 4 on nende kolme versiooni kohta sobivusfunktsiooni väärtused ehk oodatavad kasumid. Näeme, et neist parim tulemus 11132,86 on saavutatud korduste arvuga $R = 20$ ning tsüklite arvuga $C = 200$, kuid jällegi on erinevus tulemuste vahel küllaltki väike.

Plokk	$R = 10, C = 400$		$R = 20, C = 200$		$R = 40, C = 100$	
	$q_i (MWh)$	$b_i (€/MWh)$	$q_i (MWh)$	$b_i (€/MWh)$	$q_i (MWh)$	$b_i (€/MWh)$
1	18,55	31,34	18,60	30,30	19,59	29,93
2	38,29	31,67	37,39	31,78	38,44	30,49
3	56,69	31,68	56,69	32,22	57,09	31,62
4	75,65	33,09	76,17	32,65	76,54	32,53
5	94,08	33,15	93,99	33,09	95,42	33,14
6	113,47	34,39	113,64	33,19	114,20	33,61
7	132,69	35,73	131,85	33,48	133,52	38,51
8	151,30	36,01	150,42	36,35	153,05	39,08
9	170,45	36,67	168,29	37,71	171,10	41,50
10	196,00	40,13	195,97	38,80	195,04	41,56

Tabel 3: *Gen_2* PSO-meetodil saadud hinnad ja kogused ploki kaupa

Parameetrid	Tulemus (€)
$R = 10, C = 400$	10926,25
$R = 20, C = 200$	11132,86
$R = 40, C = 100$	10971,55

Tabel 4: *Gen_2* tulemused

Implementation of particle swarm optimization on electricity market

Summary

Gerda Rakaselg

This bachelor thesis consists of giving an overview of the electricity market in Estonia, introducing the method of particle swarm optimization (PSO) and implementing PSO on a problem associated with electricity market.

Electricity market was opened only in the beginning of year 2013 in Estonia. Thus this subject is topical at the moment.

We concentrate on power producers in the day-ahead market, specifically on submitting an offer curve to the day-ahead market. In order to maximize profit, power companies need appropriate bidding strategies. In this thesis one strategy is described and a method for calculating necessary prices and quantities for electricity is introduced.

Particle swarm optimization is a computation technique, which is inspired by swarm behaviour such as fish schooling or bird flocking. PSO is initialized with a population of random particles and it searches for solution by updating generations. The particles fly through the n -dimensional problem space moving towards both current individual and current global optimum position.

In last chapter of this thesis a theoretical example of finding an offer curve for two electricity generators is solved implementing particle swarm optimization. It is modelled using MATLAB.

Kirjandus

- [1] G. Dozier, J. Valenzuela, A. D. Yucekaya, *Strategic bidding in electricity markets using particle swarm optimization*, Electric Power Systems Research 79 (2009), 335-345.
- [2] Eleringi veebileht, <http://elering.ee/elektrituru-kasiraamat/> (26.05.2013).
- [3] J. V. Kumar, D. M. V. Kumar, *Particle swarm optimization based optimal bidding strategy in an open electricity market*, International Journal of Engineering, Science and Technology 3 (2011), nr. 6, 283-294.
- [4] Nord Pool Spoti veebileht, <http://www.npspot.com/> (26.05.2013).
- [5] PSO-meetodit tutvustav veebileht, <http://www.swarmintelligence.org/> (26.05.2013).
- [6] A. Raukas, P. Siitam, *Põlevkivienergeetika tulevikust*, Eesti Põlevloodusvarad ja –jäätmed (2012), 6-8.
- [7] H. Sutter, *Kuidas kujuneb elektri referentshind elektribörsil?*, <http://www.seminar.aripaev.ee/images/originalimages/Hando%20Sutter-78469.pdf> (26.05.2013).
- [8] X.-S. Yang, *Engineering Optimization*, John Wiley & Sons, Inc., Cambridge, 2010.

Lisa 1. Turutasakaaluhindade tabel

Tund	Versioon											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	33,89	34,46	33,82	33,84	34,77	34,31	33,67	34,06	33,83	33,99	34,59	33,85
2	33,80	32,95	33,88	33,36	33,33	33,16	33,67	33,89	33,85	33,82	33,56	34,42
3	32,30	32,00	31,88	32,24	32,43	33,34	33,06	34,07	33,27	32,52	32,13	31,83
4	31,75	32,55	31,76	32,15	32,05	32,27	32,27	33,35	31,72	32,34	32,33	32,72
5	35,92	35,85	36,30	36,37	35,00	36,31	36,38	36,37	36,86	35,72	35,66	35,70
6	43,41	42,28	42,11	42,42	41,92	42,09	42,17	42,86	41,51	42,63	41,44	42,41
7	43,61	44,37	45,50	44,76	44,73	43,77	44,08	44,87	44,61	44,41	44,33	43,95
8	49,96	49,95	50,30	50,11	49,65	49,77	49,75	49,57	48,72	50,00	49,63	48,90
9	50,30	51,07	51,51	50,96	50,70	50,65	49,79	50,80	51,20	51,66	51,58	50,40
10	50,37	50,24	50,86	50,46	50,27	50,17	49,79	50,45	50,85	49,17	49,94	49,91
11	49,01	49,01	48,84	49,18	48,40	48,39	48,77	49,13	48,69	49,46	48,18	48,73
12	46,56	47,72	47,38	46,89	47,43	47,62	47,13	47,61	47,19	47,18	46,35	47,31
13	46,74	46,68	46,69	46,84	46,51	46,71	46,76	47,78	46,84	47,56	46,84	46,31
14	46,61	45,91	46,17	47,78	46,02	46,74	45,75	46,30	46,31	46,81	47,14	45,78
15	43,52	44,61	43,43	43,86	43,41	43,45	43,15	43,66	44,06	44,52	43,50	43,51
16	45,21	44,49	44,53	44,17	45,71	44,33	45,19	43,41	44,26	44,33	45,28	44,47
17	44,62	44,92	44,94	44,40	45,76	44,50	44,75	44,39	44,11	44,31	44,63	45,47
18	45,38	46,20	45,97	45,70	45,57	44,70	45,78	44,87	46,02	46,34	46,34	45,54
19	45,72	45,91	45,36	45,46	44,85	45,82	46,31	46,32	45,41	46,25	46,05	46,02
20	47,95	47,67	47,49	47,64	47,60	47,89	47,92	47,99	48,95	47,65	48,38	47,63
21	48,20	48,43	48,26	48,19	48,44	48,89	48,25	47,67	46,82	46,84	47,37	47,45
22	44,90	45,58	45,59	46,46	46,24	46,29	47,20	45,30	45,74	47,08	44,94	45,67
23	42,56	42,19	43,00	42,06	43,11	42,17	43,12	42,08	42,99	42,61	42,31	41,63
24	34,50	33,98	33,21	33,87	34,69	32,99	34,06	34,30	33,99	34,13	33,68	34,15

Lisa 2. MATLABi kood turutasakaaluhindade genereerimiseks

```
% Turutasakaaluhindade stsenaariumite genereerimine
% Gerda Rakaselg, Tartu Ülikool, 2013

global P;
%loeme Exceli tabelist Elspoti hinnad 24 tunni kohta 17.
aprillil
L=xlsread('elspot.xlsx','B4:B27');
%genereerime 12 24-tunnilist stsenaariumi
P=repmat(L,1,12);
J=0.5*randn(24,12);
P=P+J;
```


Lisa 3. MATLABi kood kulufunktsioonide leidmiseks

```
% Generaatorite kulufunktsioonide leidmine
% Gerda Rakaselg, Tartu Ülikool, 2013

global pol_G1 pol_G2;
kyttev22rtus=2.33; %põlevkivi kütteväärtus (MWh/t)
p_hind=12; %põlevkivi (hind €/t)
%loeme Exceli tabelist andmed elektrigeneraatorite kohta
E=xlsread('eestienergia.xlsx','E4:FF6');
%eraldame andmetest kahe generaatori elektrikoormused (MWh)
koormus_G1=E(1,1:154);
koormus_G2(1,1)=E(1,1);
koormus_G2(1,2:153)=E(1,7:158);
%eraldame andmetest kahe generaatori koormustele vastavad
kasutegurid
kasutegur_G1=E(2,1:154);
kasutegur_G2(1,1)=E(3,1);
kasutegur_G2(1,2:153)=E(3,7:158);
%leiame generaatorite koormustele vastavad põlevkivikogused
(t)
p6levkivi_G1=koormus_G1./kasutegur_G1/kyttev22rtus;
p6levkivi_G2=koormus_G2./kasutegur_G2/kyttev22rtus;
%leiame generaatorite koormustele vastavad kulutused
põlevkivile (€)
kulu_G1=p_hind*p6levkivi_G1;
kulu_G2=p_hind*p6levkivi_G2;
%lähendame generaatorite koormuste ja kulude suhet
ruutpolünoomile
pol_G1=polyfit(koormus_G1,kulu_G1,2);
pol_G2=polyfit(koormus_G2,kulu_G2,2);
```

Lisa 4. MATLABi kood osakeste parve modelleerimiseks

```
% Osakeste parve meetodi tsüklite ja korduste juhtimine
% Gerda Rakaselg, Tartu Ülikool, 2013

gen=2; %määrab millise generaatori kohta arvutusi teeme
R=40; %korduste arv
C=100; %tsüklite arv
G=0; %parim tulemus alguses minimaalne
%kordame osakeste parve meetodit etteantud tsüklite arvu ja
generaatoriga
%nii mitu korda, kui on korduste arvuga määratud
for r=1:R
    [q,b,g]=parvlemine(C,gen);
    %kui uue kordusega leitud parim tulemus on senisest
    parem, siis
    %uuendame parimat tulemust ja koguse ning
    hinnavektoreid
    if g>=G
        G=g; %parim tulemus
        Q=q; %elektrikoormustele vastav vektor
        B=b; %elektri hindadele vastav vektor
    end
end
```

```

% Osakeste parve meetod, populatsiooni genereerimine ja
uuendamine
% Gerda Rakaselg, Tartu Ülikool, 2013

function [gq,gb,G]=parvlemine(n,gen)
    m=30; %osakeste populatsiooni suurus
    w=0.5; %inertsii iseloomustav konstant
    c1=2; %enda parima tulemuse suunas liikumise kiirust
määrav konstant
    c2=2; %globaalse parima tulemuse suunas liikumise
kiirust määrav konstant
    %kasutame arvutustes generaatorile vastavat
maksimaalset elektrikoormust
    if gen==1
        maxq=192;
    elseif gen==2
        maxq=196;
    end
    %genereerime osakeste populatsiooni
    Xq=zeros(m,10); %osakestele vastavad elektrikoormused
    Xb=zeros(m,10); %osakestele vastavad pakkumishinnad
    for i=1:m
        Xq(i,1)=maxq/11.0+2*rand(); %elektrikoormus
        Xb(i,1)=30+3*rand(); %pakkumishind
        q=Xq(i,1);
        for j=2:9
            Xq(i,j)=maxq/11.0+2*rand(); %elektrikoormus
            Xb(i,j)=Xb(i,j-1)+5*rand(); %pakkumishind
            q=q+Xq(i,j);
        end
        Xq(i,10)=maxq-q; %elektrikoormus
        Xb(i,10)=Xb(i,j-1)+5*rand(); %pakkumishind
    end
    %genereerime algsed kiirusvektorid
    Vq=zeros(m,10);
    Vb=zeros(m,10);
    %arvutame osakeste positsioonide sobivused
    Sp=zeros(1,m);
    for i=1:m
        Sp(1,i)=sobivus(Xq,Xb,i,gen);
    end
    %algselt on iga osakese parim positsioon tema esimene
ja ainuke positsioon
    Xqp=Xq;
    Xbp=Xb;
    %leiame globaalse parima positsiooni
    [C,I]=max(Sp);
    G=C; %globaalsele parimale vastav sobivusfunktsiooni
väärtus

```

```

        gq=Xqp(I,:);      %globaalsele      parimale      vastavad
elektrikoormused
        gb=Xbp(I,:);      %globaalsele      parimale      vastavad
pakkumishinnad
        Gq=repmat(gq,m,1);
        Gb=repmat(gb,m,1);
        for r=1:n
            r1=rand(1,10); %juhuslikud suurused, mis määravad
osakese liikumise kiiruse
            r2=rand(1,10); %vastavalt enda ja globaalse parima
tulemuse suunas
            R1=repmat(r1,m,1);
            R2=repmat(r2,m,1);
            Vq=w*Vq+c1*R1.*(Xqp-Xq)+c2*R2.*(Gq-Xq);      %arvutame
uued kiirusvektorid
            Vb=w*Vb+c1*R1.*(Xbp-Xb)+c2*R2.*(Gb-Xb);
            Xq=Xq+Vq; %leiame osakeste uued positsioonid
            Xb=Xb+Vb;
            %kontrollime, kas osakeste parimaid tulemusi on
vaja uuendada
            %ja vajadusel ka teeme seda
            for i=1:m
                s=sobivus(Xq,Xb,i,gen);
                if s>Sp(1,i)
                    Sp(1,i)=s;
                    Xqp(i,:)=Xq(i,:);
                    Xbp(i,:)=Xb(i,:);
                end
            end
            %kontrollime, kas globaalset parimat tulemust on
vaja uuendada
            %ja vajadusel ka teeme seda
            [C,I]=max(Sp);
            if C>G
                G=C;      %globaalsele      parimale      vastav
sobivusfunktsiooni väärtus
                gq=Xqp(I,:);      %globaalsele      parimale      vastavad
elektrikoormused
                gb=Xbp(I,:);      %globaalsele      parimale      vastavad
pakkumishinnad
                Gq=repmat(gq,m,1);
                Gb=repmat(gb,m,1);
            end
        end
    end
end

```

```

% Sobivusfunktsiooni väärtuse arvutamine
% Gerda Rakaselg, Tartu Ülikool, 2013

function[s]=sobivus(Xq,Xb,i,gen)
    global P pol_G1 pol_G2;
    %kasutame arvutustes generaatorile vastavat
    kulufunktsiooni ja maksimaalset elektrikoormust
    if gen==1
        pol=pol_G1;
        maxq=192;
    elseif gen==2
        pol=pol_G2;
        maxq=196;
    end
    %kontrollime kitsendusfunktsioonide kehtivust
    sum_q=0;
    kontroll=0;
    for j=1:10
        sum_q=sum_q+Xq(i,j);
        if Xb(i,j)<=0 || Xb(i,j)>=500 || Xq(i,j)<=0 ||
Xq(i,j)>=maxq
            kontroll=1;
        end
    end
    for j=2:10
        if Xb(i,j)<Xb(i,j-1)
            kontroll=1;
        end
    end
    if sum_q>maxq
        kontroll=1;
    end
    s=0;
    %turutasakaaluhindu on 12 versiooni kõigi 24h kohta,
    kõik tuleb läbi vaadata
    if kontroll==0
        for k=1:12
            sum=0;
            for t=1:24
                deltaq=0;
                for j=1:10
                    if Xb(i,j)<=P(t,k)
                        deltaq=deltaq+Xq(i,j);
                    else
                        break;
                    end
                end
                E=P(t,k)*deltaq-polyval(pol,deltaq);
                sum=sum+E;
            end
        end
    end
end

```

```
        end
        s=s+sum;
        s=s/12.0;
    end
end
end
```

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Gerda Rakaselg (sünnikuupäev: 30.04.1991)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Osakeste parvega optimeerimise rakendamine elektribörsil“, mille juhendaja on Peep Miidla
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 04.06.2013